# ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با پودر کربنات کلسیم کریستال*

غلامحسین حامدی[1] محسن سهرابی[2]

**چکیده** *در این پژوهش تأثیر پوشش سطح سنگ‌دانه‌ها با پودر کربنات کلسیم کریستال بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از روش‌های مکانیکی و ترمودینامیکی مورد ارزیابی قرارگرفته استنتاج آزمایش‌های مکانیکی نشان می‌دهد مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های اصلاح‌شده افزایش یافته است. همچنین، نتایج روش انرژی آزاد سطحی نشان می‌دهد که اصلاح سطح سنگ‌دانه‌ها به ترتیب موجب کاهش و افزایش مؤلفه‌های اسیدی و بازی آن‌ها شده است. این تغییرات موجب افزایش چسبندگی سنگ‌دانه با قیر که یک ماده اسیدی است، می شود. بعلاوه مقادیر انرژی آزاد شده در حضور رطوبت برای نمونه‌های اصلاح شده کاهش‌یافته است که بیانگر کاهش تمایل مخلوط به عریان‌شدگی است.*

**واژه‌های کلیدی** خرابی رطوبتی، اصلاح سنگ‌دانه، کربنات کلسیم کریستال، لاتمن اصلاح‌شده، انرژی آزاد سطحی.

# Evaluation of Moisture Sensitivity of Modified Asphalt Mixtures with Crystal Calcium Carbonate Powder

Gholam Hossein Hamedi Mohsen Sohrabi

**Abstract** *In this research, by using mechanical and thermodynamic methods, the effect of surface coatings of aggregates with crystal calcium carbonate powder on the moisture sensitivity of asphalt mixtures has been evaluated. The results show that the indirect tensile strength of the modified specimens has been increased. as Also, the result of SFE method indicates that, with aggregate surface modification, their acidic and basic components respectively have been reduced and increased. Due to these changes, the adhesion between aggregates and bitumen (which is an acidic substance) increase. In addition, the amount of released energy in the presence of moisture has been reduced for modified specimens, which indicates a reduction in the tendency of the mixture for stripping.*

**Key Words** Moisture damage, Aggregate treatment, Crystal calcium carbonate, Modified Lottman test, Surface free energy.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۶/۹/۲۳ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/۲/۱۸ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: استادیار، گروه عمران، دانشکدهٔ فنی، دانشگاه گیلان، رشت.

(۲) دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد عمران، راه و ترابری، دانشگاه ارومیه.

**Email:** hamedi@guilan.ac.ir

## مقدمه

بسیاری از مقاطع راه‌ها بدون تعمیر و نگهداری اساسی هرگز طول عمری موردنظر را نخواهد داشت زیرا روسازی‌ها در طول دورهٔ طرحشان تحت اثر شرایط پیش‌بینی‌نشدهٔ محیطی نظیر رطوبت قرار می‌گیرند [1].

یکی از عوامل اصلی ترمیم پیش از موعد روسازی‌های آسفالتی اثرات سوء رطوبت در مخلوط‌های آسفالتی است که معمولاً به نام خرابی رطوبتی شناخته می‌شود [2] یکی از این روش‌های پیشگیرانه استفاده از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی در زمان طرح اختلاط است که با اصلاح خواص مصالح می‌تواند موجب ایجاد عملکرد بهتر برای روسازی و درنتیجه کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری -حتّی با در نظر گرفتن هزینه افزودنی‌ها- شود [1]. هدف اصلی استفاده از مواد ضد عریان‌شدگی در مخلوط‌ها، بهبود پیوندهای چسبندگی بین قیر و سنگ‌دانه است [3]، چراکه وجود ضعف در این پیوندها به‌عنوان یکی از عوامل اصلی بروز خرابی‌های رطوبتی شناخته می‌شود.

به‌طورکلی دو رویکرد جامع برای استفاده از مواد ضد عریان‌شدگی جهت بهبود چسبندگی و کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی وجود دارد: رویکرد نخست پوشش سطح سنگ‌دانه‌ها با یک ماده ضد عریان‌شدگی مناسب معمولاً جامد مانند آهک هیدراته، سیمان پرتلند، پلیمرها و... است. رویکرد دیگر تقویت خواص چسبندگی و پیوستگی قیر با استفاده از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی مایع است. [4,5]. استفاده از این افزودنی‌ها در کنار مزیت‌هایی که دارند دارای معایبی نظیر افزایش حساسیت نسبت به سایر خرابی‌ها مانند شیار شدگی هست [6]. درنتیجه استفاده از یک افزودنی مناسب که دارای حداقل مشکلات اجرایی و فنّی باشد، امری ضروری تلقی می‌شود. لذا در این پژوهش از یک ماده ضد عریان‌شدگی با خصوصیات بازی قوی و قیمت مناسب برای اصلاح سطح سنگ‌دانه‌ها به جهت افزایش چسبندگی بین قیر و سنگ‌دانه استفاده شده است و میزان تأثیر آن در شرایط خشک و مرطوب با روش‌های مختلف مورد ارزیابی قرارگرفته است.

در طی سالیان آزمایش‌های بسیاری جهت ارزیابی تأثیر افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی بر روی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی توسعه داده‌شده است. روش‌های مرسوم برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی بر اساس آزمایش‌های مکانیکی است که بر روی مصالح متراکم (Compacted) و غیر متراکم (loose) انجام می‌شود. در این آزمایش‌ها نظیر آزمایش لاتمن اصلاح‌شده مقاومت مخلوط‌ها به‌طورکلی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و خصوصیات مصالح و نقش آن‌ها در حساسیت رطوبتی به‌طور مستقل اندازه‌گیری نمی‌شود. به عبارتی، اگرچه این روش‌ها حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها را ازنظر خواص مکانیکی ارزیابی می‌کنند، اما نمی‌تواند خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مرتبط با مکانیسم‌های چسبندگی و جداشدگی را بیان کنند. به‌طوری‌که در این روش، تنها از یک نسبت مکانیکی (مدول یا مقاومت کششی) هنگامی‌که مخلوط تحت شرایط قرارگرفته و نگرفته است، جهت اندازه‌گیری حساسیت رطوبتی آن استفاده می‌شود [7]. درنتیجه برای اینکه بتوان مصالحی با مقاومت بالا در مقابل حساسیت رطوبتی برای مخلوط‌های آسفالتی انتخاب کرد، ضروری است خصوصیات آن‌ها به‌درستی شناخته شود تا بتوان خرابی‌های رطوبتی را پیش‌بینی نمود و با تغییر خصوصیات منفی مصالح، حساسیت آن‌ها را در برابر رطوبت کاهش داد؛ بنابراین نیاز به یک روش ساده و قابل تکرار که توانایی ارزیابی چندمنظوره عملکرد روسازی آسفالتی در حضور رطوبت را داشته باشد احساس می‌شود [8].

## پژوهش‌های پیشین

از گذشته تاکنون مطالعات بسیاری در زمینه ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی صورت گرفته است. از این میان تعدادی از آن‌ها به بررسی و معتبرسازی

روش‌های نوین در تعیین حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها پرداخته‌اند، مانند مطالعاتی که الفیگستون [10] و بی‌هاسین [7] در سال‌های ۱۹۷۷ و ۲۰۰۶ به‌عنوان رسالهٔ دکتری خود انجام داده‌اند. الفینگستون در پژوهش خود به بررسی تأثیر مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی سنگ‌دانه و قیر بر روی پیوستگی و چسبندگی مخلوط آسفالتی پرداخت و نشان داد که استفاده از روش‌های ترمودینامیک می‌توان برای تعیین حساسیت رطوبتی به کار رود. بی‌هاسین نیز در پژوهش خود به توسعهٔ روش‌ها و جزئیات اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر و سنگ‌دانه پرداخت و نشان داد که روش صفحه ویلهلمی و دستگاه جذب همگانی را می‌توان با دقت مناسب برای تعیین مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر و سنگ‌دانه استفاده نمود.

علاوه بر چنین پژوهش‌هایی تحقیقاتی مبنی بر استفاده از افزودنی‌ها و ارزیابی تأثیر آن‌ها با استفاده از روش‌های مکانیکی و ترمودینامیکی انجام‌شده‌اند. عربانی و حامدی [11] در پژوهشی به نقش پوشش پلیمری سطح سنگ‌دانه‌ها در کاهش خرابی رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از روش انرژی آزاد سطحی و مدول دینامیکی پرداختند. در مطالعه‌ای که توسط مقدّس‌نژاد و همکاران [12] انجام شد، تأثیر استفاده از ماده آهک هیدراته بر خرابی رطوبتی، با استفاده از روش انرژی آزاد سطحی موردبررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که استفاده از این ماده موجب کاهش مؤلفه‌های اسیدی و افزایش مؤلفه‌های بازی سنگ‌دانه‌های مورداستفاده می‌شوند. همچنین، نتایج نشان داد با استفاده از این ماده انرژی سطحی کل سنگ‌دانه‌ها کاهش می‌یابد. میرحسینی و همکاران [13] از روش انرژی آزاد سطحی به‌منظور ارزیابی امکان استفاده از خاکستر هستهٔ خرما به‌عنوان اصلاح‌کنندهٔ قیر برای افزایش مقاومت در برابر خرابی رطوبتی استفاده کردند. بررسی‌ها نشان داد که نتایج هر دو روش باهم سازگاری دارند و بیانگر این است که استفاده از خاکستر هسته خرما، پتانسیل خرابی رطوبتی را در مخلوط‌های آسفالتی کاهش می‌دهند. قابچی و همکاران [14] در مطالعه‌ای تأثیر نوع قیر (PG 64-22) و (PG 76-28)، اضافه کردن افزودنی‌های بازیافتی(RAP) ، مقدار آن‌ها و نوع سنگ‌دانه‌ها -سنگ‌آهک، ریولیت، ماسه‌سنگ، گرانیت، شن و بازالت- را بر حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی با استفاده از تئوری انرژی آزاد سطحی موردبررسی قرار دادند و نشان دادند که پتانسیل خرابی رطوبتی برای هردو قیر مورداستفاده و انواع سنگ‌دانه‌های فوق با افزایش درصد RAP کاهش می‌یابد.

اخیراً استفاده از نانو ذرات در اصلاح سطح سنگ‌دانه‌ها برای کاهش حساسیت خرابی‌های رطوبتی موردتوجه قرار گرفته است. در این راستا حامدی و مقدس نژاد [15]، سطح سنگ‌دانه‌های آهکی و گرانیتی را با استفاده از نانو اکسید روی و نانو کربنات کلسیم اصلاح کردند. نتایج حاصل نشان داد که نسبت مقاومت کششی نمونه‌های اصلاح‌شده در مقایسه با نمونه‌های کنترل افزایش یافت. همچنین نتایج آزمایش‌های انرژی آزاد سطحی نشان داد که استفاده از این مواد باعث کاهش در تفاوت بین انرژی آزاد سطحی مصالح در حالت مرطوب و خشک می‌شود که این امر موجب کاهش عریان‌شدگی خواهد شد. در مطالعه‌ای، خدایی و همکاران [16] به بررسی تأثیر ماده ضد عریان‌شدگی زایکوسُیل بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی پرداختند. این ماده سطح سیلانول سنگ‌دانه‌های اسیدی را به سطح سیلوکسان تبدیل کرده و باعث کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی تحت بارگذاری سیکلی مورداستفاده در این پژوهش شده است. در پژوهشی حامدی [17] از نانو ذرات به‌عنوان افزودنی برای اصلاح سطح سنگ‌دانه‌ها استفاده کرد. نتایج حاصل از بررسی‌های او نشان می‌دهد که نسبت مقاومت کششی نمونه‌های اصلاح‌شده در حالت خشک و مرطوب بیشتر از نمونه‌های کنترل هستند که نشان‌دهنده افزایش مقاومت این نمونه‌ها است. همچنین نتایج حاصل از روش‌های ترمودینامیکی نشان‌دهنده این بود که اصلاح سطح

سنگ‌دانه‌ها با استفاده از نانو ذرات موجب کاهش قدر مطلق انرژی جداشدگی و درنتیجه عریان‌شدگی می‌شوند.

## اهداف پژوهش

محقّقان اخیراً از رویکردهای جدید، نظیر استفاده از مفاهیم انرژی آزاد سطحی (انرژی‌های چسبندگی و پیوستگی) که بر کاستی‌های آزمایش‌های مرسوم غلبه دارد، استفاده می‌کنند [9]. با استفاده از این روش‌ها می‌توان مکانیسم خرابی‌های رطوبتی و تأثیر عوامل مختلف نظیر ویژگی‌های قیر و سنگ‌دانه و افزودنی‌ها را بر خرابی رطوبتی شناسایی کرد. درنتیجه از این طریق می‌توان احتمال وقوع این خرابی‌ها را پیش‌بینی نمود و راه‌حل‌های مناسبی را جهت کاهش خرابی رطوبتی در زمان طرح اختلاط ارائه داد؛ بنابراین عمده‌ترین اهداف پژوهش حاضر را می‌توان به‌صورت زیر دسته‌بندی کرد:

۱. اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی نمونه‌های پایه و اصلاح‌شده با پودر کربنات کلسیم؛
۲. شناسایی تأثیر اصلاح سنگ‌دانه‌ها در افزایش انرژی چسبندگی و کاهش انرژی جداشدگی؛
۳. بررسی تأثیر اصلاح سطح سنگ‌دانه‌ها بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از روش‌های مکانیکی.

## انرژی آزاد سطحی mJ/m

ازنظر مولکولی انرژی آزاد سطحی را می‌توان به صورت انرژی اضافی در سطح مواد در مقایسه با انرژی موجود در حجم آن‌ها تعریف کرد [18]. این انرژی اضافی در سطح برابر با انرژی آزاد گیبس ($\Delta G$) که یک کمیت ترمودینامیکی مهم در کمی کردن پیوند چسبندگی است، می‌باشد [19].

ازنظر ترمودینامیکی انرژی آزاد سطحی یک جسم، مقدار کار یا انرژی موردنیاز برای ایجاد یک سطح واحد جدید به سطح همان ماده در شرایط خلأ است. کار چسبندگی (Wa) اصطلاح متداولی است که معمولاً در ادبیات مربوط به تئوری چسبندگی ترمودینامیکی از آن استفاده می شود. کار چسبندگی عبارت است از مقدار کار موردنیاز برای جدا کردن دو ماده متصل‌به‌هم (قیر و سنگ‌دانه) از یکدیگر [20]. انرژی آزاد گیبس و کار چسبندگی ازنظر اندازه باهم برابر است و رابطهٔ زیر بین آن‌ها برقرار است:

$$W^a = -\Delta G^a \quad (۱)$$

در میان تئوری‌های ارائه شده برای محاسبه انرژی آزاد سطحی مواد، بهترین تئوری شناخته‌شده تئوری ون اوس–چادهوری–گود (VOCG) است [21]. این تئوری بیان می‌کند که انرژی آزاد هر ماده‌ای به سه مؤلفه تقسیم می‌شود:

۱. مؤلفهٔ غیر قطبی که به آن مؤلفه لیفشیتز وندروالز یا مؤلفه پراکنده نیز گفته می‌شود؛
۲. مؤلفهٔ اسیدی لوئیس؛
۳. مؤلفهٔ بازی لوئیس.

بر طبق این تئوری، انرژی آزاد سطحی کل همهٔ مواد با استفاده از رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

$$\Gamma^{total} = \Gamma^{lw} + \Gamma^{AB} = \Gamma^{LW} + 2\sqrt{\Gamma^{+}\Gamma^{-}} \quad (۲)$$

که در آن:

$\Gamma^{total}$: انرژی آزاد سطحی کل، $\Gamma^{LW}$: مؤلفه‌ی غیر قطبی، $\Gamma^{+}$: مؤلفهٔ اسیدی لویس، $\Gamma^{-}$: مؤلفهٔ بازی لویس، $\Gamma^{AB}$: مؤلفهٔ اسیدی بازی (قطبی).

پیوند چسبندگی بین قیر و سنگ‌دانه را می‌توان با قرار دادن مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر و سنگ‌دانه در رابطهٔ زیر محاسبه نمود [22]:

$$W^{a}_{sb} = 2(\sqrt{\Gamma^{lw}_{s}\Gamma^{lw}_{b}} + \sqrt{\Gamma^{+}_{s}\Gamma^{-}_{b}}) + \sqrt{\Gamma^{-}_{s}\Gamma^{+}_{b}}) \quad (۳)$$

نیروی پیوستگی قیر مقدار انرژی موردنیاز برای ایجاد دو سطح از یک ماده (در اینجا قیر) است. پیوستگی قیر را می‌توان با استفاده از معادلهٔ زیر و با قرار دادن مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی آن محاسبه نمود [23]. واضح است که کار پیوستگی قیر (انرژی شکست) دو برابر انرژی آزاد سطحی قیر است.

$$W_{bb}^{a} = 2(\sqrt{\Gamma_b^{lw}\Gamma_b^{lw}} + \sqrt{\Gamma_b^{+}\Gamma_b^{-}}) + \sqrt{\Gamma_b^{-}\Gamma_b^{+}}) =$$
$$2\Gamma_b^{lw} + 4\sqrt{\Gamma_b^{+}\Gamma_b^{-}}$$
(٤)

انرژی آزاد چسبندگی قیر- سنگ‌دانه را در حضور آب، کار یا انرژی جداشـــدگی می نامند. مقدار آن را می‌توان با استفاده از رابطهٔ زیر محاسبه کرد:

$$W_{bsw}^{wet} = \Gamma_{bw} + \Gamma_{sw} - \Gamma_{bs} \quad (٥)$$

که در آن:

$\Gamma_{sw}$ : انرژی بین سطحی سنگ‌دانه و آب، $\Gamma_{bs}$ انرژی بین سطحی قیر و سنگ‌دانه است.

انرژی بین سطحی دو ماده i و j را با استفاده از مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی و رابطهٔ (٦) محاسبه می‌شود [22]:

$$\Gamma_{ij} = \Gamma_i^{total} + \Gamma_j^{total} - 2(\sqrt{\Gamma_i^{lw}\Gamma_i^{lw}} + \sqrt{\Gamma_i^{+}\Gamma_j^{-}}) + \sqrt{\Gamma_i^{-}\Gamma_j^{+}}) \quad (٦)$$

که در آن:

$\Gamma_i^{lw}, \Gamma_i^{+}, \Gamma_i^{-}$: مؤلفه انرژی آزاد جسم i

$\Gamma_i^{total}, \Gamma_j^{total}$: انرژی آزاد سطحی کل دو ماده iو j

$\Gamma_j^{lw}, \Gamma_j^{+}, \Gamma_j^{-}$ : مؤلفهٔ انرژی آزاد جســـم j مقادیر فوق پارامترهای مهمی هستند که برای ارزیابی خرابی رطوبتی استفاده می‌شوند.

## مصالح

در این پژوهش از سه نوع سنگ‌دانه آهکی، گرانیتی و کوارتزیتی استفاده شده است. دلیل اصلی استفاده از این نوع سنگ‌دانه‌ها درجهٔ آب‌دوستی و خصوصیات کانی‌شناسی متفاوت آن‌هاست تا بتوان تأثیر نوع سنگ‌دانه‌ها با کانی‌های مختلف و با حساسیت‌های مختلف در برابر خرابی رطوبتی را مورد ارزیابی قرار داد. با توجه به خصوصیات شیمیایی ترکیب کانی‌های تشکیل‌دهندهٔ سنگ‌دانه‌ها که در جدول (١) قابل‌مشاهده است، دانه‌بندی مورداستفاده در این پژوهش حد وسط منحنی شماره ٤ دانه‌بندی پیوسته مخلوط‌های آسفالتی گرم آیین‌نامه ٢٣٤ [٢٤] است.

قیر استفاده‌شده در این پژوهش از نوع ٧٠-٦٠ است و مشخصات آن به شرح جدول (٢) است.

برای اصلاح سطح سنگ‌دانه‌ها از پودر کریستال کربنات کلسیم با فرمول شیمیایی ٣CaCO به دلیل خصوصیات بازی و قیمت مناسبی که دارد استفاده شده است. پودر مورداستفاده در این پژوهش از شرکت پودر سازان آزادی تهیه شده است. مشخصات شیمیایی آن در جدول (٣) قابل‌مشاهده است.

جدول ١ درصد کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ‌دانه‌های مورداستفاده در این پژوهش

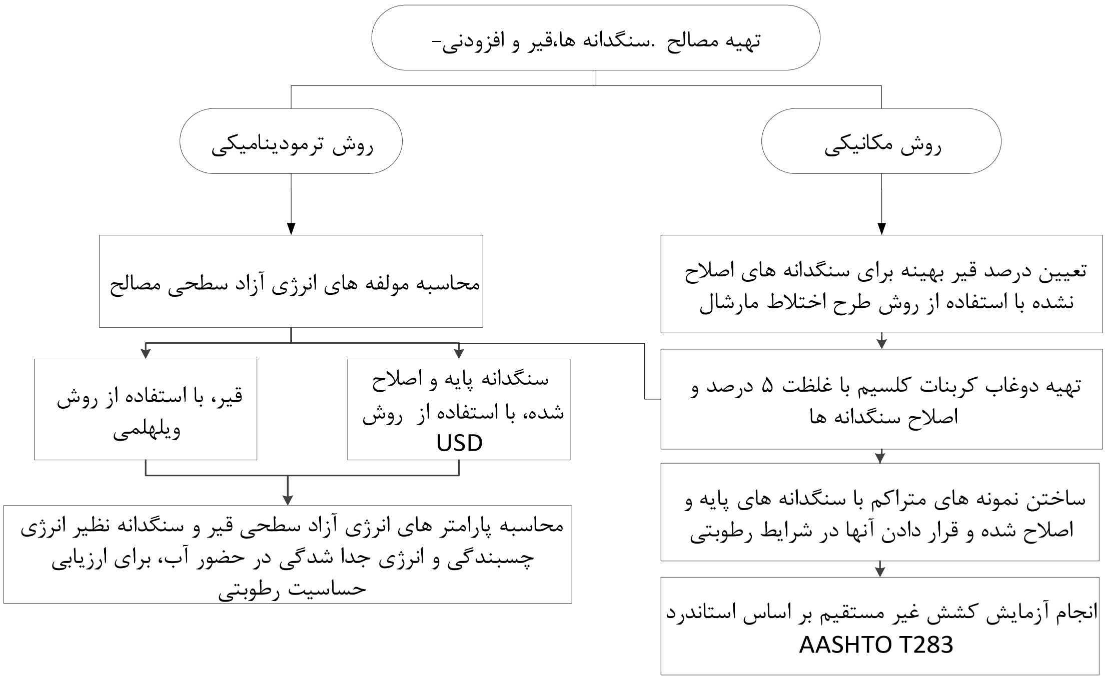
| نوع کانی / سنگ‌دانه | Silicon dioxide, $SiO_2$ | Aluminium oxide, $Al_2O_3$ | Ferric oxide, $Fe_2O_3$ | Magnesium oxide, MgO | Calcium oxide, CaO |
|---|---|---|---|---|---|
| سنگ‌آهک | ١٦/٥٨ | ٤/٨٤ | ٣/٨٧ | ٢/٢٤ | ٧٢/٤٧ |
| گرانیت | ٥٢/١٩ | ٦/٠٥ | ٧/٠٨ | ٢/٩٢ | ٣١/٧٥ |
| کوارتزیت | ٦٦/٩٦ | ١٣/٦٧ | ٤/٠٩ | ١/٧٦ | ١٣/٥٣ |

جدول ٢ مشخصات قیرهای پایه مورداستفاده در این پژوهش

| ویژگی | چگالی در ٢٥ درجه | درجه نفوذ | نقطه نرمی درجه | شکل‌پذیری cm | درجه اشتعال | افت وزنی ٪ | درجهٔ خلوص ٪ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| استاندارد | ASTM D70-76 | ASTM D5-73 | ASTM D36-76 | ASTM D113-79 | ASTM D92-78 | ASTM D1754-78 | ASTM D2042-76 |
| مقدار مجاز | - | ٧٠-٦٠ | ٥٦-٤٩ | حداقل ١٠٠ | حداقل ٢٣٢ | - | - |
| ٧٠-٦٠ | ١/٠٢ | ٦٦ | ٥١ | ١٠٥ | ٢٦٢ | ٠/٧٥ | ٩٩/٥ |

جدول ۳ مشخصات شیمیایی پودر کربنات کلسیم کریستال

| Sample | $SiO_2$% | $Al_2O_3$% | $Fe_2O_3$% | CaO% | NaO% | $K_2O$% | MgO% | $TiO_2$% | MnO% | $P_2O_5$% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $CaCO_3$ | ۰/۱٤ | ۰/۰۷ | ۰/۰۲ | ٥٦/۸۲ | ۰/۰٦ | ۰/۰۱ | ۰/۲٦ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۸۲ |




شکل ۱ الگوریتم برنامه آزمایشگاهی

## برنامۀ آزمایشگاهی

روند انجام برنامه آزمایشـــگاهی پژوهش حاضـــر در فلوچارت شکل (۱) قابل‌مشاهده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می شود آزمایش‌های مورداستفاده در دو دســـته آز مایش های م کانیکی و ترمودی نامیکی طبقه‌بندی کرد.

در آز مایش های م‌کانیکی ابتدا طرح اختلاط به روش مارشـــال انجام خواهد شـــد. ســـپس، آزمایش حسا سیت رطوبتی به روش لاتمن ا صلاح شده بر روی نمونه‌های کنترل و اصـــلاح شـــده انجام می‌شـــود تا اثر اســـتفاده از پوشـــش کربنات کلســـیم بر روی ســـطح سنگ‌دانه‌ها بررسی شود.

در آز مایش های ترمودینامیکی، مؤلفه های انرژی آزاد سطحی قیر و سنگ‌دانه‌ها با استفاده از روش صفحه ویلهلمی و د ستگاه USD اندازه‌گیری می شود. سپس، با اســـتفاده از روابط ترمودینامیک پارامترهای انرژی آزاد چسبندگی قیر-سنگ‌دانه و انرژی جداشدگی در حضور آب محا سبه می شود تا اثر ا ستفاده از پو شش‌دار کردن سنگ‌دانه‌ها موردبررسی قرار گیرد.

## آزمایش لاتمن اصلاح‌شده (AASHTO T283)

این آزمایش رایج‌ترین روش آزمایشـگاهی برای ارزیابی خرابی رطوبتی مخلوط ها اســـت که در آن یک نمو نه اســـتوانه‌ای افقی تحت بارگذاری قائم قرار می‌گیرد. این بارگذاری باعث ایجاد تنش کششی در راستای قطر آن و درنتیجه ترک خوردن و گســـیختگی نمونه در شـــرایط

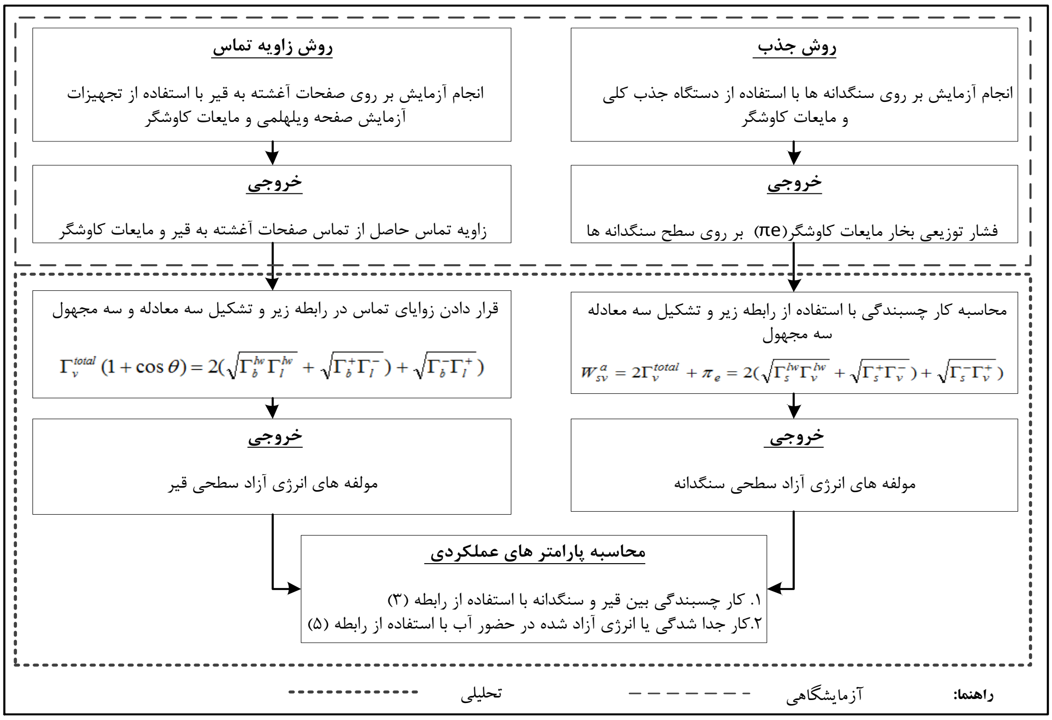
مرطوب و خشک می‌شود. نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت مرطوب به خشک شاخص نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم را به دست می‌دهد که شاخص حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی است.

## محاسبه و ارزیابی خرابی رطوبتی با استفاده از روش SFE

برای محاسبه و ارزیابی خرابی رطوبتی با استفاده از تئوری انرژی آزاد سطحی از مجموعه‌ای از آزمایش‌ها و روابط تئوری ا ستفاده می شود. لذا برای درک ساده این روشِ تئوری-آزمایشگاهی، خلاصه‌ای از روند محاسبه انرژی آزاد سطحی مصالح و درنهایت ارزیابی رطوبتی به‌صورت یک فلوچارت در شکل (۲) ارائه می‌شود.

همان‌طور که در فلوچارت شکل (۲) مشاهده می شود، برای اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر و سنگ‌دانه نیاز به مایعاتی است که مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی آن‌ها معلوم باشد.

مشخصات مایعات کاوشگر استفاده‌شده، در جدول (٤) قابل‌مشاهده است.




شکل ۲ الگوریتم تعیین حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها بر اساس روش انرژی آزاد سطحی

جدول ٤ مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی مایع‌های آزمایش در روش صفحه ویلهلمی $(mJ/m^2)$

| | آهک پایه | آهک اصلاح‌شده | گرانیت پایه | گرانیت اصلاح‌شده | کوارتزیت پایه | کوارتزیت اصلاح‌شده |
|---|---|---|---|---|---|---|
| یک سیکل | ۸٤ | ۸۷ | ۷۳ | ٦۳ | ۷۲ | ۷٤ |
| سه سیکل | ۷۳ | ۷۹ | ٦۰ | ٥۰ | ٦۰ | ٦٤ |
| پنج سیکل | ٥۹ | ٦۸ | ٤۸ | ۳٤ | ٤٦ | ٤۹ |

## نتایج و بحث

### نتایج طرح اختلاط

نتایج حا صل از آزمایش‌های طرح اختلاط مار شال برای ترکیب‌های پایه نشـــان می‌دهد که درصـــد قیر بهینه به ترتیب برای ســـنگ‌دانه‌های آهکی، گرانیتی و کوارتزیتی برابر با ۵/۹، ۵/۲ و ۵/۵ اســت. همان‌طور که مشــخص ا ست میزان در صد قیر بهینه برای سنگ‌دانه‌های آهکی بی شتر از سنگ‌دانه‌های گرانیتی و کوارتزیتی ا ست. این امر به دلیل خلل و فرج بیشـــتر ســـطوح ســـنگ‌دانه سنگ‌آهک و جذب بی‌شتر این نوع سنگ‌دانه ن‌سبت به نمونه‌های گرانیتی و کوارتزیتی است.

### نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی

***مقاومت کششی غیرمستقیم.*** همان‌طور که از آشکال زیر قابل‌مشاهده است مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) با افزایش تعداد سیکل‌های یخ و ذوب کاهش می‌یابد که این کاهش می‌تواند به علت از دست دادن چسبندگی مخلوط یا پیوستگی قیر ناشی از حضور بیشتر نمونه‌ها در معرض رطوبت باشد؛ بعلاوه مشاهده می‌شود مقاومت کششی غیرمستقیم برای سنگ‌دانه‌های گرانیتی و کوارتزیتی در شرایط خشک بیشتر از سنگ‌دانه‌های آهکی است اما به‌طورکلی و در شرایط مرطوب سنگ‌دانه‌های آهکی با افزایش سیکل‌های یخ و ذوب عملکرد بهتری در برابر خرابی داشته و سنگ‌دانه‌های کوارتزیتی دارای ضعیف‌ترین عملکرد در مقابل رطوبت نسبت به دو نوع سنگ‌دانه‌ی دیگر بوده‌اند. بعلاوه علت مقاومت بیشتر در سنگ‌دانه‌های گرانیتی می‌تواند قفل و بست مکانیکی مناسب باشد که با توجه به آب‌دوست بودن آن‌ها حتی با وجود مقاومت بیشتر این نوع سنگ‌دانه‌ها در حالت خشک، زمانی که در معرض رطوبت قرار گرفتند پیوندهای آن‌ها شکسته شده و مقاومت خود را ازدست‌داده‌اند. با توجه به شکل‌های (۳ و ٤) می‌توان دریافت که استفاده از پوشش کربنات کلسیم میکرونیز شده برای تمامی مخلوط‌ها دارای اثر مثبت بوده است اما تأثیر آن برای سنگ‌دانه‌های کوارتزیتی در افزایش مقاومت کششی بیشتر از نمونه‌های گرانیتی و آهکی است. علاوه بر این، میزان نرخ کاهش مقاومت کششی نمونه‌های اصلاح‌شده نسبت به نمونه‌های پایه کمتر بوده است.

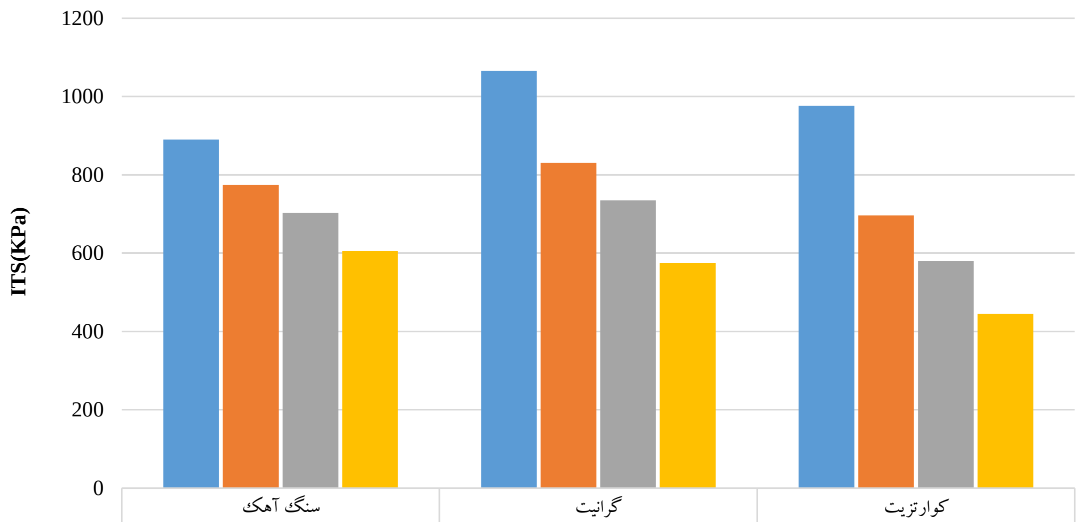
کانی‌های تشــکیل‌دهنده ســنگ‌دانه‌های کوارتزیتی غالباً ذرات ا سیدی می‌با شند که ا صلاح سطح این نوع سنگ‌دانه‌ها توان‌سته نتایج منا سبی در ترکیب با قیر ۶۰-۷۰ در شــرایط مرطوب بخصــوص با پنج ســیکل یخ و ذوب داشـــته باشـــد. در حالت کلی همان‌طور که در مطالعات پی شین قابل‌م شاهده ا ست [5,12,16] عملکرد سنگ‌دانه‌های آهکی ازنظر مقاومت ک‌ش‌شی غیرم‌ستقیم در شرایط مرطوب، به علت خصوصیات آب‌گریز بودن، از ســـنگ‌دانه‌های گرانیتی و کوارتزیتی مناســـب‌تر بوده اســـت به‌طوری‌که می‌توان در شـــکل‌های (۳) و (٤) مشـاهده نمود که نرخ کاهش مقاومت نمونه‌های آهکی با افزایش ســـیکل های یخ و ذوب در م‌قایســـه با سنگ‌دانه‌های گرانیتی و کوارتزیتی بسیار کمتر است.

***نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم.*** با توجه به شکل‌های زیر، همان‌طور که در بخش قبل برای مقادیر مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) مشاهده شد، نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR) نمونه‌ها نیز، با افزایش سیکل‌های یخ و ذوب کاهش داشته است. همچنین مشاهده می‌شود که استفاده از افزودنی ضد عریان‌شدگی کربنات کلسیم میکرونیز شده باعث شده است تا مقاومت مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده در تمامی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های کنترل بهبود یابد. مقادیر این نسبت برای سنگ‌دانه‌های آهکی پایه و اصلاح‌شده بیشتر است. به عبارتی سنگ‌دانه‌های آهکی بیشترین مقاومت را در برابر خرابی رطوبتی از خود نشان داده‌اند، درحالی‌که سنگ‌دانه‌های کوارتزیتی کمترین میزان مقاومت در برابر خرابی رطوبتی را دارا هستند.




| | سنگ آهک | گرانیت | کوارتزیت |
|---|---|---|---|
| خشک | 885 | 1034 | 945 |
| یک سیکل | 743.4 | 754.82 | 595.35 |
| سه سیکل | 646.05 | 620.4 | 472.5 |
| پنج سیکل | 522.15 | 496.32 | 321.3 |

شکل ۳ مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های کنترل




| | سنگ آهک | گرانیت | کوارتزیت |
|---|---|---|---|
| خشک | 890 | 1065 | 976 |
| یک سیکل | 774.3 | 830.7 | 696.24 |
| سه سیکل | 703.1 | 734.85 | 580.2 |
| پنج سیکل | 605.2 | 575.1 | 444.82 |

شکل ٤ مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های اصلاح‌شده

از مقادیر جدول زیر مشخص است، اصلاح سطح تمامی سنگ‌دانه‌ها در حالت مرطوب دارای اثر مثبت بوده و موجب افزایش نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم شده است. این افزایش در مقاومت کششی غیرمستقیم می‌تواند در اثر بهبود میزان چسبندگی در نمونه‌های اصلاح‌شده باشد. با توجه به اینکه ذرات کربنات کلسیم دارای خصوصیات قلیایی (بازی) هستند استفاده از آن توانسته میزان چسبندگی بین قیر و سنگ‌دانه‌ها به‌ویژه سنگ‌دانه‌های اسیدی کوارتزیت را افزایش دهد، به‌گونه‌ای که در پنج سیکل یخ و ذوب این نسبت دارای ۲٦/۱۰ درصد افزایش مقاومت است. به‌گونه‌ای که در پنج سیکل یخ–ذوب این نسبت دارای ۲٦/۱۰ درصد افزایش مقاومت است.

## نتایج آزمایش‌های انرژی آزاد سطحی

***اندازه‌گیری انرژی آزاد سطحی قیر با استفاده از صفحه ویلهلمی.*** قیر به‌عنوان یک ماده با خصوصیات اسیدی شناخته می‌شود. درنتیجه مؤلفه‌های اسیدی قیر بایستی از مؤلفه‌های بازی آن بزرگ‌تر باشد. نتایج ارائه‌شده در جدول (٦) برای قیر استفاده‌شده در این پژوهش این مطلب را تأیید می‌کند.

جدول ٥ نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم برای نمونه‌های پایه و اصلاح‌شده (٪)

| نوع قیر | مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $\Gamma+$ اسیدی | $\Gamma-$ بازی | $\Gamma_{AB}$ قطبی | $\Gamma_{LW}$ غیر قطبی | $\Gamma_t$ کل |
| AC ٦۰-۷۰ | ۱/۸۹ | ۰/٦۸ | ۲/۲۷ | ۱٤/۰۱ | ۱/۲۸٦ |

جدول ٦ مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیرهای مورداستفاده ($mJ/m^2$)

| نوع سنگ‌دانه | مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $\Gamma+$ اسیدی | $\Gamma-$ بازی | $\Gamma_{AB}$ قطبی | $\Gamma_{LW}$ غیر قطبی | $\Gamma_t$ کل |
| سنگ‌آهک | ۲۱/۳ | ٥۰۸/۹ | ۲۰۸/۲ | ٦۷/۲ | ۲۷٥/٤ |
| سنگ‌آهک اصلاح‌شده با کربنات کلسیم | ۱٤/٦ | ٥۱٦/۷ | ۱۷۳/۷ | ۷۹/۳ | ۲٥۳/۰ |
| گرانیت | ۳٤/۱ | ٥۳۱/۲ | ۲٦۹/۲ | ٦۸/۱ | ۳۷۳/۳ |
| گرانیت اصلاح‌شده با کربنات کلسیم | ۲۷/۰ | ٥۳۹/٥ | ۲٤۱/٤ | ٦۹/۲ | ۳۱۰/٦ |
| کوارتزیت | ٤۱/۳ | ٤۹۲/۱ | ۲۸٥/۱ | ٥۷/۱ | ۳٤۲/۲ |
| کوارتزیت اصلاح‌شده با کربنات کلسیم | ۳۲/۸ | ٥۱۹/٦ | ۲٦۱/۱ | ٥٦/۹ | ۳۱۸/۰ |

جدول ۷ مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی سنگ‌دانه‌های مورداستفاده ($mJ/m^2$)

| نوع سنگ‌دانه | مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $\Gamma+$ اسیدی | $\Gamma-$ بازی | $\Gamma_{AB}$ قطبی | $\Gamma_{LW}$ غیر قطبی | $\Gamma_t$ کل |
| سنگ‌آهک | ۲۱/۳ | ۵۰۸/۹ | ۲۰۸/۲ | ٦۷/۲ | ۲۷۵/٤ |
| سنگ‌آهک اصلاح‌شده با کربنات کلسیم | ۱٤/٦ | ۵۱٦/۷ | ۱۷۳/۷ | ۷۹/۳ | ۲۵۳/۰ |
| گرانیت | ۳٤/۱ | ۵۳۱/۲ | ۲٦۹/۲ | ٦۸/۱ | ۳۷۳/۳ |
| گرانیت اصلاح‌شده با کربنات کلسیم | ۲۷/۰ | ۵۳۹/۵ | ۲٤۱/٤ | ٦۹/۲ | ۳۱۰/٦ |
| کوارتزیت | ٤۱/۳ | ٤۹۲/۱ | ۲۸۵/۱ | ۵۷/۱ | ۳٤۲/۲ |
| کوارتزیت اصلاح‌شده با کربنات کلسیم | ۳۲/۸ | ۵۱۹/٦ | ۲٦۱/۱ | ۵٦/۹ | ۳۱۸/۰ |

***اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی سنگ‌دانه‌ها.*** نتایج اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی سنگ‌دانه‌ها با استفاده از روش USD در جدول (۷) ارائه‌شده است. نتایج نشان می‌دهند که اصلاح سطح سنگ‌دانه‌ها به ترتیب موجب کاهش و افزایش مؤلفه‌های اسیدی و بازی هر سه نوع سنگ‌دانه شده است. ازآنجاکه قیر به‌عنوان یک ماده اسیدی شناخته می‌شود، بازی شدن سنگ‌دانه‌ها باعث ایجاد چسبندگی بهتر بین قیر و سنگ‌دانه‌های اسیدی می‌شود. بعلاوه نتایج حاکی از آن است که سنگ‌دانه‌های اصلاح‌شده دارای مؤلفه‌های قطبی کمتری نسبت به نمونه‌های پایه می‌باشند. بر اساس مطالعات پیشین میزان قطبیت سنگ‌دانه‌ها نشان‌دهنده‌ی وجود درصد بالای کانی دی‌اکسید سلیکون در آن‌ها است [25] که مقادیر ارائه‌شده در جدول (۱) این امر را تأیید می‌کند. لذا کاهش قطبیت سنگ‌دانه‌ها موجب کاهش آب‌دوستی و افزایش چسبندگی با قیر که یک ماده غیر قطبی است، می‌شود. در این راستا بیشترین تأثیر کربنات کلسیم بر روی سنگ‌دانه‌های آهکی بوده و سپس سنگ‌دانه‌های گرانیتی و کوارتزیتی که به ترتیب توانسته تا ۱٦/۵۸، ۱۰/۳۳ و ۸/٤۳ درصد مؤلفه‌های قطبی سنگ‌دانه‌های آهکی، گرانیتی وکوارتزیتی را کاهش دهد. نتایج جدول (۷) نشان می‌دهد که اصلاح سطح سنگ‌دانه‌ها موجب افزایش جزء غیر قطبی در سنگ‌دانه‌های آهکی و گرانیتی شده است. این امر از طریق ایجاد پیوندهای کووالانسی موجب افزایش چسبندگی سنگ‌دانه‌ها با قیر (که یک ماده غیر قطبی است) می‌شود. از طرف دیگر افزایش خصوصیات غیر قطبی که معادل با کاهش خصوصیات قطبی است باعث می‌شود تا میل به چسبندگی و تر شدگی سنگ‌دانه‌ها توسط آب کاهش یابد. درنهایت مشاهده می‌شود استفاده از پوشش کربنات کلسیم بر روی سطح سنگ‌دانه‌ها موجب کاهش انرژی آزاد سطحی کل سنگ‌دانه‌ها می‌شود؛ که این امر موجب افزایش قابلیت پوشش پذیری سنگ‌دانه‌ها خواهد شد. مقادیر کاهش به ترتیب برای سنگ‌دانه‌های آهکی و گرانیتی بیشتر است اما برای سنگ‌دانه‌های کوارتزیتی تأثیر پوشش سنگ‌دانه‌ها بر کاهش انرژی آزاد سطحی کل کمتر بوده است.

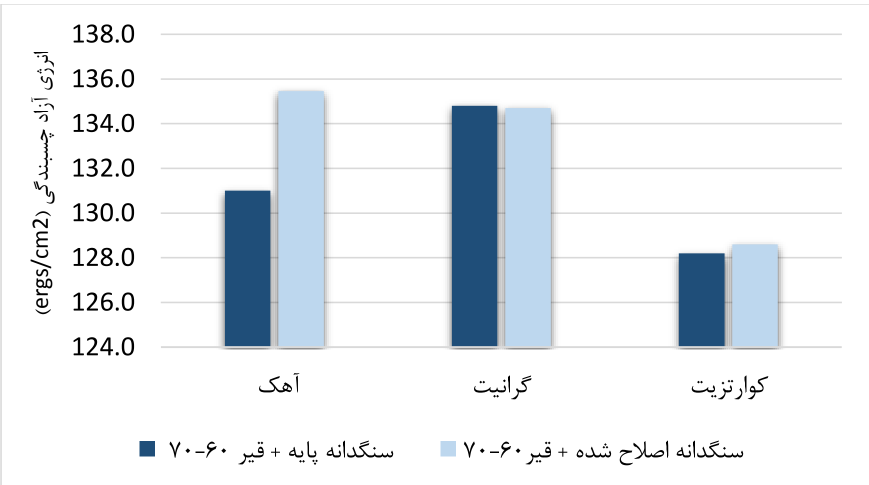
***انرژی آزاد چسبندگی.*** انرژی آزاد چسبندگی یکی از پارامترهای مهم در تعیین مقاومت چسبندگی مخلوط‌های آسفالتی است. بنا به تعریف انرژی آزاد چسبندگی مقدار انرژی موردنیاز برای جداسازی غشای قیر از واحد سطح سنگ‌دانه است [17]. بیشتر بودن آن به معنی مقاومت بالای مخلوط در برابر عریان‌شدگی است.

پس از اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر و سنگ‌دانه و داشتن مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی آب که به ترتیب در جدول‌های (٦)، (۸) و (٤) قابل‌مشاهده است، می‌توان با استفاده از رابطهٔ (۳) می‌توان چسبندگی

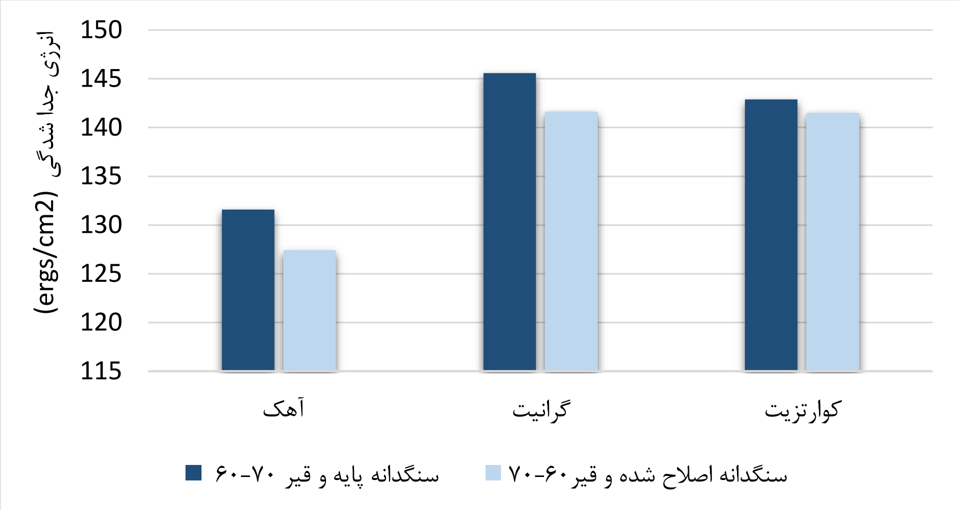
قیر–سنگ‌دانه، آب–قیر و آب سنگ‌دانه را محاسبه نمود. لازم به ذکر است با توجه به اینکه چسبندگی آب–قیر و آب–سنگ‌دانه بعد از رخداد عریان‌شدگی ایجاد می‌شوند، این پارامترها به‌عنوان پارامترهای مؤثر در رخداد خرابی رطوبتی در نظر گرفته نشده و در ادامه فقط به انرژی آزاد چسبندگی قیر–سنگ‌دانه و همچنین انرژی آزاد چسبندگی در حضور آب پرداخته خواهد شد.

با توجه به شکل (۵) مشاهده می‌شود که انرژی چسبندگی بین قیر و سنگ‌دانه‌های کوارتزیتی در مقایسه با سنگ‌دانه‌های گرانیتی و آهکی کمتر است این امر می‌تواند به علت خصوصیات اسیدی سنگ‌دانه‌های کوارتزیتی باشد.

استفاده از پوشش کربنات کلسیم بر روی سنگ‌دانه‌های آهکی موجب افزایش در میزان چسبندگی قیر–سنگ‌دانه در مخلوط‌ها شده است؛ اما اصلاح سنگ‌دانه‌های گرانیتی و کوارتزیتی تأثیری چندانی بر افزایش انرژی (کار) چسبندگی بین قیر–سنگ‌دانه برای مخلوط‌ها نداشته است. بلکه موجب کاهش میزان چسبندگی (به مقدار اندک) در حالت خشک برای سنگ‌دانه‌های گرانیتی شده است. این رخداد می‌توان درنتیجه کاهش خلل و فرج سطح سنگ‌دانه‌های اصلاح‌شده نسبت به سنگ‌دانه‌های پایه باشد. پارامتر انرژی جداشدگی یکی دیگر از موارد مهمی است که باید برای ارزیابی خرابی رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی موردتوجه قرار گیرد. این پارامتر معادل با انرژی چسبندگی بین قیر و سنگ‌دانه در حضور آب است. مقادیر آن با استفاده از مؤلفه‌های انرژی آزاد چسبندگی قیر، سنگ‌دانه و آب و رابطهٔ (۵) قابل‌محاسبه است. محاسبات انجام‌شده نشان می‌دهد که انرژی جداشدگی در حضور آب منفی است. این مطلب به این معنا است که همه‌ی مخلوط‌های آسفالتی در حضور رطوبت دچار عریان‌شدگی خواهند شد اما شدت و سرعت این پدیده در آن‌ها متفاوت است. هر چه مقدار این انرژی منفی‌تر باشد به این معنی است که مقدار انرژی آزادشده ناشی از واکنش مخلوط قیر و سنگ‌دانه در حضور آب (عریان‌شدگی) بیشتر بوده است و مخلوط دارای حساسیت بیشتری به خرابی رطوبتی است. به عبارتی زمانی که آب به سیستم قیر و سنگ‌دانه وارد می‌شود مخلوط دچار ناپایداری شده و برای اینکه به حالت پایدار برسد مجبور به آزاد کردن انرژی خواهد شد. لذا فرآیند جداشدگی سنگ‌دانه و قیر در حضور آب به‌صورت خود به خودی است. لازم به ذکر است که برای سهولت تحلیل نتایج، در این پژوهش قدر مطلق انرژی جداشدگی مدنظر قرار می‌گیرد.




شکل ۵ انرژی چسبندگی بین قیر و سنگ‌دانه در حالت خشک




شکل ٦ انرژی جداشدگی برای مخلوط‌های پایه و اصلاح‌شده

با توجه به شکل (٦) قدر مطلق انرژی جداشدگی برای ترکیب‌های پایه بیشتر است که این امر نشان‌دهنده‌ی پتانسیل بیشتر این ترکیب‌ها به خرابی رطوبتی است. همچنین می‌توان مشاهده نمود که انرژی جداشدگی سنگ‌دانه‌های آهکی نسبت به دو نوع سنگ‌دانه دیگر کمتر است که این امر به دلیل خصوصیت آب‌گریزی سنگ‌دانه‌های آهکی قابل پیش‌بینی بود.

استفاده از پوشش آب‌گریز کربنات کلسیم موجب کاهش در میزان انرژی جداشدگی همه‌ی نمونه‌ها شده است. بیشترین میزان تغییرات به ترتیب در نمونه‌های ساخته‌شده با سنگ‌دانه‌های آهکی و سپس سنگ‌دانه‌های گرانیتی و کوارتزیتی است.

## نتیجه گیری

این پژوهش به‌منظور ارزیابی تأثیر استفاده از کربنات کلسیم میکرونیز شده جهت پوشش و اصلاح سطح سنگ‌دانه‌ها در کاهش خرابی رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی انجام گرفت. در این راستا از دو روش مختلف مکانیکی و ترمودینامیکی برای ارزیابی مخلوط‌ها استفاده شد که علاوه بر بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های پایه و اصلاح‌شده بتوان مکانیسم خرابی و تأثیر افزودنی مذکور را مورد ارزیابی قرار داد.

## نتیجه‌گیری‌ها

مهم‌ترین نتایج حاصل از آزمایش‌های فوق در بخش زیر ارائه می‌شود:

۱. اصلاح سطح سنگ‌دانه‌ها با پودر میکرونیز شده کربنات کلسیم موجب افزایش مقادیر TSR و مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) نمونه‌های ساخته‌شده در حالت مرطوب می‌شود.

۲. استفاده از پوشش کربنات کلسیم مقدار انرژی آزاد سطحی کل سنگ‌دانه‌های مورداستفاده را کاهش داده است. کاهش انرژی آزاد سطحی کل موجب افزایش قابلیت پوشش پذیری و چسبندگی قیر بر روی سنگ‌دانه‌ها می‌شود.

۳. پوشش کربنات کلسیم با تغییر در مؤلفه‌های اسیدی و بازی سنگ‌دانه‌ها باعث شده است تا افزایش چسبندگی بین قیر (که یک ماده اسیدی است) و سنگ‌دانه‌ها ایجاد می‌شود. این رخداد هم‌راستا با مطالعه انجام‌شده توسط مقدس‌نژاد و همکاران [12] است که از آهک هیدراته برای اصلاح سطح سنگ‌دانه‌ها استفاده کرده بودند.

٤. استفاده از کربنات کلسیم مؤلفه‌های قطبی سنگ‌دانه‌ها را کاهش داده است. این کاهش، باعث افزایش روغن دوستی و کاهش میل به چسبندگی و تر شدگی

سنگ‌دانه‌ها توسط یک ماده قطبی مانند آب می‌شود. پوشش سطح سنگ‌دانه‌ها موجب افزایش مؤلفه‌های غیر قطبی برای سنگ‌دانه‌های آهکی و گرانیتی می‌شود اما برای سنگ‌دانه‌های کوارتزیتی مقادیر این مؤلفه کاهش یافته است افزایش مؤلفه‌های غیر قطبی می‌تواند با ایجاد پیوند کوالانسی موجب افزایش چسبندگی سنگ‌دانه با قیر (که یک ماده غیر قطبی است) شود.

۵. استفاده از پوشش کربنات کلسیم بر روی سنگ‌دانه‌های آهکی موجب افزایش در میزان چسبندگی قیر–سنگ‌دانه در مخلوط‌ها شده است؛ اما برای سنگ‌دانه‌های گرانیتی و کوارتزیتی تأثیری بر افزایش انرژی چسبندگی بین قیر–سنگ‌دانه برای مخلوط‌های نداشته است بلکه موجب کاهش میزان چسبندگی برای سنگ‌دانه‌های گرانیتی (به مقدار اندک) در حالت خشک‌شده است.

٦. استفاده از پوشش آب‌گریز کربنات کلسیم موجب کاهش در میزان انرژی جداشدگی نمونه‌ها شده است. این موضوع سبب می‌شود تا سیستم قیر–سنگ‌دانه ازنظر ترمودینامیکی در حالت پایدارتری باشد و شدت رخداد عریان‌شدگی کاهش می‌یابد.

۷. نتایج مشاهده‌شده از دو روش نشان‌دهنده‌ی همبستگی مناسب بین دو روش مکانیکی و ترمودینامیکی است.

## مراجع


1. A. John Boyes, Reducing Moisture Damage in Asphalt Mixes Using Recycled Waste Additives, Msc Dissertation: California Polytechnic State University,San Luis Obispo, (2011).
2. S. Caro Spinel, A Coupled Micromechanical Model of Moisture-Induced Damage in Asphalt Mixtures:Formulation and Applications., PhD Dissertation: Texas A&M University, (2009).
3. F. Moghadas Nejad, A. R. Azarhoosh, G. H. Hamedi and M. J. Azarhoosh, "Influence of using nonmaterial to reduce the moisture susceptibility of hot mix asphalt," *Constr. Build. Mater*, Vol. 31, No. 6, pp. 384–388, (2012).
4. A. S. Aksoy, K. S¸amlioglu, S. Tayfur and H. Ozen, "Effects of various additives on the moisture damage sensitivity of asphalt mixtures," *Constr. Build. Mater*, Vol. 19, No. 1, pp. 11–18, (2005).
5. P. E. Sebaaly, "Comparison of lime and liquid additives on the moisture damage of hot mix asphalt mixtures," Arlington, VA: National Lime Association, (2007).
6. G. H. Hamedi, F. Moghadas Nejad and K. Oveisi, "Investigating the effects of using nanomaterials on moisture damage of HMA," *Road Mater. Pavement Des.*, Vol. 16, No. 3, pp. 11–17, (2015).
7. A. Bhasin, Development of methods to quantify bitumen-aggregate adhesion and loss of adhesion due to water., PhD Dissertation: Texas A&M University, (2006).
8. B. Shah, "Evaluation of moisture damage within asphalt concrete mixes," Phd Dissertation,Texas A&M University, (2003).
9. Y. Kim, J. S. Lutif, A. Bhasin and N. D. Little, "Evaluation of moisture damage mechanisms and effects of hydrated lime in asphalt mixtures through measurements of mixture component properties and performance testing," *J. Mater. Civ. Eng.*, Vol. 20, No. 10, pp. 659–667, (2008).

10. G. M. Elphingstone, "Adhesion and Cohesion in Asphalt-Aggregate Systems,Ph.D. Dissertation," Texas A&M University, (1997).
11. M. Arabani and G. Hamedi, "Using the surface free energy method to evaluate the effects of polymeric aggregate treatment on moisture damage in hot-mix asphalt," *J. Mater. Civ. Eng.*, Vol. 23, No. 6, pp. 802-811, (2010).
12. F. Moghadas Nejad, G. H. Hamedi and A. R. Azarhoosh, "Use of Surface Free Energy Method to Evaluate Effect of Hydrate Lime on Moisture Damage in Hot-Mix Asphalt," *J. Mater. Civ. Eng.*, Vol. 25, No. 8, pp. 1119-1126, (2013).
13. S. F. Mirhosseini, M. Khabiri, A. Kavussi and M. Jalal Kamali, "Applying surface free energy method for evaluation of moisture damage," Construction and Building Materials, vol. 125, pp. 408-416, (2016).
14. R. Ghabchi , D. Singh and M. Zaman, "Evaluation of moisture susceptibility of asphalt mixes containing RAP and different types of aggregates and asphalt binders using the surface free energy method," *Constr. Build. Mater*, Vol. 73, No. 1, pp. 479-489, (2014).
15. G. H. Hamedi and F. Moghadas Nejad, "Use of aggregate nanocoating to decrease moisture damage of hot mix," *Road Mater. Pavement Des.*, Vol. 17, No. 1, pp. 35–51, (2015).
16. A. Khodaii, . V. Khalifeh, M. H. Dehnad and G. H. Hamedi, "Evaluating the Effect of Zycosoil on Moisture Damage of Hot-Mix Asphalt Using the Surface Energy Method," *J. Mater. Civ. Eng.*, Vol. 26, No. 2, pp. 259-266, (2014).
17. G. H. Hamedi, "Investigating the Use of Nano Coating Over the Aggregate Surface on Moisture Damage of Asphalt Mixtures," Int. J. Civ. Struct. Eng., Vol. 16, No. 6, pp. 659-669, (2016).
," *International Journal of Civil Engineering*, (2017).
18. R. Ghabchi, Z. Musharraf, B. Rifat, K. Murat and D. Singh, "WMA Pavements in Oklahoma: Moisture Damage and Performance Issues," University Transportation Center, Oklahoma, (2013).
19. A. W. Hefer, Adhesion in Bitumen-Aggregate Systems and Quantification of the Effects of Water on the Adhesive Bond, phd Dissertation, Texas : A&M University, (2004).
20. I. L. Al-Qadi, I. M. Abuawad, H. Dhasmana and J. S. Trepanier, "Effects of Various Asphalt Binder Additives/Modifiers on Moisture-Susceptible Asphaltic Mixtures," University of Illinois, (2014).
21. A. Bhasin and D. Little, "Application of Microcalorimeter to Characterize Adhesion Between Asphalt Binders and Aggregates," *J. Mater. Civ. Eng.*, Vol. 21, No. 6, pp. 235-243, (2009).
22. N. M. Wasiuddin, C. M. Fogel, M. M. Zaman and E. A. O'Rear, "Effect of Anti-Strip Additives on surface Free Energy Characteristics of Asphalt Binders for Moisture-Induced Damage Potential," *J. Test. Eval.*, Vol. 35, No. 1, pp. 36-44, (2007).
23. A. Bhasin, . D. N. Little , K. L. Vasconcelos and E. Masad, "Surface Free Energy to Identify Moisture

Sensitivity of Materials for Asphalt Mixes," *Transp. Res. Rec.*, Vol. 2001, No. 1, pp. 37-45, (2007).
," Transportation Research Board, No. 2001, pp. 37–45, (2007).

۲۴. نشریه ۲۳۴, "آیین‌نامه رهسازی آسفالتی راه‌های ایران," معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور, (۱۳۹۰).

25. P. Peltonen, "Road aggregate choice based on silicate quality and bitumen adhesion," *Transp. Eng. J. ASCE.*, Vol. 118, No. 1, pp. 50-61, (1992).